



Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza (CPS)

Proyecto de Fin de Carrera

Variaciones en el
comportamiento de equipos
solares prefabricados en función
de la zona climática, de acuerdo
a la norma ISO 9459-2.

Titulación: Ingeniería Industrial.

Tomo 1/2

Autor: Marcos Lasheras Torrellas.

Correo electrónico: 534509@posta.unizar.es

Curso académico 2010/2011

Director: Dr. D. Isidoro Lillo Bravo.

Departamento: Ingeniería energética.

Centro: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla (ETSI).

Ponente: Dr. D. Antonio Valero Capilla.

Departamento: Ingeniería Mecánica.

Área: Máquinas y Motores Térmicos.

Centro: Centro Politécnico Superior de Zaragoza (CPS).

Variaciones en el comportamiento de equipos solares prefabricados de en función de la zona climática, de acuerdo a la norma ISO 9459-2.

RESUMEN

Este trabajo se apoya en los ensayos realizados por un estudiante de máster de la universidad de Sevilla. Estos ensayos proveen de valiosos datos de características de equipos solares.

El objeto de este trabajo es determinar la relación de la energía absorbida por un sistema de captación solar en diferentes climas con 4 parámetros participantes en el cálculo, variando estos de una manera que se aprecie su influencia y así poder determinar el ajuste óptimo de estos para cada zona climática. Todo ello enmarcado en las condiciones de ensayo y cálculo descritas en la norma UNE-ISO 9459-2.

El método descrito en la norma se implementa en una herramienta informática que permita un cálculo iterativo y condicionado. El software elegido es Microsoft Excel. Una hoja de cálculo permite el cálculo de la energía absorbida por el sistema a lo largo de un año, así como una presentación fácil, rápida e intuitiva de los resultados y de los datos tanto climáticos como de los equipos utilizados. Los datos climáticos utilizados son:

- Temperatura del agua de red.
- Irradiación.
- Horas de luz.
- Temperatura ambiente diurna y nocturna.

Mientras que los datos de los equipos utilizados son:

- Características técnicas (área de apertura, volumen de acumulación,...)
- Coeficiente de pérdidas térmicas del acumulador (Us).
- Gráfica Q-H (parámetros a_1 , a_2 y a_3).
- Perfiles de extracción $f(V)$ y $g(V)$.

El método de cálculo se ha aplicado a cuatro ciudades distintas, cada una representa unas condiciones climáticas de T^a y radiación opuestas. Estas ciudades son Atenas, Davos, Estocolmo y Wurzburg.

Entre los resultados del análisis de sensibilidad llevado a cabo se pueden destacar:

- Mayor importancia de la Gráfica Q-H frente a los demás, especialmente de a_1 .
- Decreciente importancia de Us frente a un consumo creciente.
- Ínfima influencia de la optimización de los perfiles de extracción $f(V)$ y $g(V)$.

Por último se han intentado reflejar las relaciones entre los parámetros experimentales y las características técnicas de los equipos con los datos disponibles para poder sugerir el mejor ajuste posible de los equipos solares para las dadas condiciones climatológicas.

Tabla de contenido

RESUMEN	2
1.- Introducción	5
2.- Análisis bibliográfico	8
3.- Implementación informática de la metodología de la estimación del rendimiento de un equipo solar prefabricado a largo plazo de acuerdo a la norma UNE-ISO 9459-2	10
3.1.- Comparación con la metodología acreditada	16
4.- Definición de parámetros y equipos analizados para las diferentes zonas climáticas	19
5.- Conclusiones	25
5.1.- Sobre la norma:.....	25
5.2.- Sobre los equipos:.....	25
5.3.- Sobre los resultados del análisis de sensibilidad:	26
5.4.- Selección de equipos óptima según condiciones climáticas y consumo:	28
6.- Referencias.....	32
Anexo 1.- Datos climáticos	34
Atenas.....	34
Davos	36
Estocolmo	38
Wurzburg.....	40
Anexo 2.- Datos de equipos utilizados	43
Anexo 3.- Resultados de metodología acreditada	59
Anexo 4.- Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros para las diferentes zonas climáticas.....	62
4.1.- Frente a variaciones de la gráfica Q-H	62
Equipo 4:	62
Equipo 11:	77
Equipo medio:	92
4.2.- Frente a variaciones de $f(V)$	107
Equipo 4:	107
Equipo 11:	112
Equipo medio:	117
4.3.- Frente a variaciones de $g(V)$	122

Equipo 4:	122
Equipo 11:	127
Equipo medio:	132
4.4.- Frente a variaciones de Us.....	137
Equipo 4:	137
Equipo 11:	142
Equipo medio:	147
Anexo 5.- Definiciones y símbolos	152

1.- Introducción

Debido a que no se ha desarrollado un método de cálculo de rendimiento aplicable a todos los modelos de sistemas solares. Se ha decidido confiar en los métodos simples que hay hasta ahora mientras se sigue trabajando para llegar a ese método de cálculo que homogeneice todos los cálculos de rendimiento. En este contexto se encuentra la norma UNE-ISO 9459:2008[1]. Y en concreto su parte número 2, en la que se describe el método de cálculo de la producción solar utilizado a lo largo de este documento para realizar los cálculos.

Este trabajo ha sido llevado a cabo dentro del departamento de ingeniería energética de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla y a su vez dentro del grupo de energías renovables de éste departamento.

El objetivo de este trabajo es realizar unos análisis de sensibilidad de los parámetros participantes en el cálculo relacionados con las características físicas de los equipos solares ,como el de la ilustración 1, como son el coeficiente de pérdidas térmicas (U_s), la gráfica Q-H y los perfiles de extracción $f(V)$ y $g(V)$. Para ello se ha implementado en un software de computación el método descrito en la norma, de forma que se puedan llevar a cabo multitud de cálculos en introducir variaciones en no demasiado espacio de tiempo. El software elegido es Microsoft Excel debido a la experiencia previa de su autor con el mismo, así como la conveniente ilustración de los datos, tanto de los equipos, como climáticos que se puede hacer utilizando el citado software.

El trabajo está basado en un trabajo previo de un estudiante de máster de la universidad de Sevilla [2], el cual aporta datos muy valiosos sobre esos parámetros a través de unos ensayos llevados a cabo según la norma UNE 12976. Estos ensayos dan como resultado los valores, para cada uno de los equipos ensayados, de cada uno de los parámetros que determinan el comportamiento de estos equipos; U_s , la gráfica Q-H y los perfiles de extracción. En el caso del coeficiente U_s , es ese mismo coeficiente el resultado de los análisis, mientras que en el caso de la Q-H el resultado son tres parámetros que dan forma a la gráfica, los parámetros a_1 , a_2 y a_3 . En el caso de los perfiles $f(V)$ y $g(V)$ se obtienen una serie de valores numéricos porcentuales que reflejan la energía extraída para cada décima parte del volumen del acumulador que cada sistema tiene, hasta un límite de 3 veces el volumen de éste.

Sobre los valores que se toman de estos ensayos se han realizado los mencionados análisis de sensibilidad para tres de los equipos ensayados y de los cuales se tienen sus parámetros definidos. Estos tres equipos son: Uno de los considerados peores, uno de los considerados mejores, y por último, un equipo ficticio que está definido por los valores medios de los parámetros teniendo en cuenta todos los equipos ensayados.

Cada uno de estos equipos se ha situado en cuatro entornos con condiciones de temperatura y radiación extremas. Estos cuatro entornos vienen representados por cuatro ciudades para poder disponer de datos climáticos fiables. Estas cuatro ciudades son:

- Atenas (Grecia).
- Davos (Suiza).
- Estocolmo (Suecia).
- Wurzburg (Alemania).

Mientras que los datos climáticos necesarios para llevar a cabo los cálculos son:

- Temperatura del agua.
- Irradiación.
- Horas de luz.
- Temperatura ambiente diurna y nocturna.

Tras la realización de estos análisis se está en disposición de determinar cuáles son los parámetros más determinantes para cada una de las condiciones climáticas, que serán el objetivo de futuras mejoras enfocadas al aumento de la captación de energía solar térmica. O simplemente el ajuste adecuado de estos parámetros para cada una de las zonas climáticas

Para la interpretación de los resultados se han utilizado multitud de gráficas que sirven para ilustrar la tendencia de la producción energética en relación con el cambio en cada parámetro, y no solo el valor de un parámetro que podría ser el rendimiento global, o la fracción solar.

Previo a la realización del trabajo en sí se realizó un análisis bibliográfico al cual se le ha dedicado un capítulo en el documento. En él se hace un breve repaso a la evolución de las técnicas de cálculo de la producción de energía térmica de los equipos, mencionando algunos de los métodos más destacados y haciendo una pequeña descripción de la metodología que usaban.

En la sección tres del presente documento se describe el método utilizado para realizar los cálculos, el cual, a su vez, viene explicado en la norma UNE-ISO 9459-2[1], mencionando los datos y las condiciones necesarias para cada apartado. A su vez se dedica un pequeño sub-apartado a la comparación del método implementado por el autor frente al implementado con anterioridad en el citado trabajo [2] en el cual se basa este trabajo.

En la sección cuatro se describe cada uno de los parámetros modificados para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, así como su relación con las correspondientes características técnicas de los paneles.

En la siguiente sección se exponen las conclusiones a las que se ha llegado tras la observación y el análisis de los resultados y la comparación de estos con las características técnicas de los equipos.

El último capítulo se dedica a la bibliografía utilizada, la cual tiene las necesarias referencias en el texto a lo largo de todo el documento.

Por último se incluyen cinco anexos. El primero de los anexos está dedicado a los datos climáticos de las localidades de referencia. En él se encuentran las gráficas que representan los datos climáticos utilizados para llevar a cabo los cálculos, así como los datos geográficos de las ciudades.

El segundo anexo está dedicado a la exposición de los datos de los equipos analizados según la norma UNE 12976 [2]. En él se encuentran dos fichas completas para los dos equipos tomados como mejor y peor, así como unas tablas y gráficas en las cuales están los valores y perfiles de todos los parámetros necesarios para el cálculo de todos los equipos.

En el tercer anexo se exponen los resultados de cálculo de captación de la metodología llevada a cabo en el trabajo en el cual se basa éste.

En la anexo cuatro se refleja el análisis de sensibilidad llevado a cabo. Esta es la parte central de este trabajo. Se incluyen 4 sub-secciones, cada una dedicada a cada uno de los cuatro parámetros para los cuales se llevan a cabo los análisis de sensibilidad.

En el quinto y último anexo se expone una tabla de definiciones de los distintos parámetros, y sus abreviaturas, presentes a lo largo de todo el documento.



Ilustración 1. Imagen de un equipo solar prefabricado

2.- Análisis bibliográfico

El primer método simplificado para el cálculo del rendimiento de un sistema termosolar fue el denominado método f-chart (Beckman et al., 1977[3]). Este método funcionaba mediante cálculos mensuales calculando el factor f utilizando unas correlaciones determinadas y habiendo calculado la demanda previamente. Esta demanda se tomaba como la estándar para el uso del sistema termosolar determinado. Estas correlaciones se calculaban a través de unos coeficientes X e Y que se determinaban según de los parámetros del sistema (F_R , τ , área de apertura,...) y de los datos climáticos (irradiación (H), T ambiente,...). A su vez, el parámetro X se ve afectado por otros dos coeficientes (K_1 y K_2) que tienen relación con las temperaturas y el tamaño del acumulador.

A través de estas correlaciones se calcula la f y así, la energía aportada por el sistema termosolar mensualmente. Por último se suman las aportaciones mensuales y se compara con la demanda prevista para analizar la cobertura obtenida con el sistema.

Este método presenta las restricciones de que las temperaturas de operación vienen restringidas dentro de unos límites en los que los parámetros que se utilizan en el método representan correctamente el comportamiento del sistema, y también la capacidad de almacenamiento viene restringida por la misma razón.

Posteriormente apareció el método ϕ -f-chart (Klein and Beckman, 1979[4]) que introduce el concepto de “utilizabilidad” de la energía incidente. Define un parámetro ϕ que participa en el cálculo de la fracción solar. Este parámetro refleja que solamente una parte de la energía incidente será capaz de incrementar la T^a del agua circulante. Sin embargo, no se considera el hecho de que el agua a alta T^a tampoco será útil, siendo este una limitación importante (y no resuelta aún).

Otro método definido para calcular la fracción solar es el definido por Gordon y Zarmi (1985[5]). Este es un método analítico en el que se resuelven las ecuaciones diferenciales que gobiernan el sistema térmico estableciendo unos tiempos de respuesta del sistema apropiados para que no sean ni demasiados grandes (más de un día) ni demasiado pequeños (minutos). De esta manera la energía solar captable para cada día se define según el producto de parámetros del captador (F_R , A), de operación ($T_{\text{operación}}$) y climáticos (H, T_{ambiente}) y se considera constante a lo largo del día. En esta expresión viene implícita la influencia de la utilizabilidad por la influencia de $T_{\text{operación}}$. Este método presenta la restricción de que necesita que el tiempo de respuesta sea el apropiado, así, no refleja bien el funcionamiento de grandes plantas (de tiempo de respuesta grande) ni de instalaciones sin almacenamiento (tiempo de respuesta pequeño). Modificaciones posteriores pretendían mejorarlo estableciendo un día típico como el cual a utilizar para los cálculos (el día que más veces se presenta a lo largo del año) (Feuermann et al., 1985[6]), o también el uso de la media de la radiación y la utilizabilidad horaria para llevar a cabo los cálculos (Reddy et al., 1987[7]).

Un cambio apreciable apareció con la regla ISO 9459-2 (1995[8]) en el método que se ha definido en la norma ISO 9459-2 se relaciona directamente la energía incidente (H) con la energía que se absorbe en el sistema (Q), es decir, que no hace falta calcular qué parte de la energía incidente será absorbida a través de rendimientos o coeficientes ya que viene determinada directamente por un valor reflejado en un gráfico (Q - H). De esta manera también se simplifica el concepto de “utilizabilidad” de la energía incidente. En todos los casos anteriores se habla del trato de la demanda, es decir, que se compara la energía obtenida con la demandada. En el caso de la ISO 9459-2 solo se tiene en cuenta la energía absorbida por los paneles, no teniendo en cuenta la naturaleza de la demanda.

Un método reciente descrito por Oliveira (2007[9]) propone un cálculo en el que se intenta discriminar la energía no útil, tanto por exceso de T^a como por defecto definiendo los parámetros de utilizabilidad ϕ (T_{min}) y ϕ (T_{max}). Estos parámetros aparecen en la ecuación del cálculo de la energía absorbida. Establece un cálculo para cada esquema de funcionamiento, con almacenamiento, y sin él. En el caso de un sistema de almacenamiento el cálculo es más simple y sólo tiene en cuenta los parámetros usuales más los ϕ ya mencionados. En el caso de sistemas con almacenamiento, el cálculo es un poco más complejo y aparecen más nuevos coeficientes (c_{stor} y c_{exc}) relacionados con las pérdidas en el acumulador y con la energía sobrante respectivamente

Un método totalmente distinto a todos los demás por su naturaleza son las redes neuronales artificiales (Kalogirou, 2000[10]). Este método consiste en entrenar una red neuronal artificial. Según Haykin, una red neuronal es un procesador de información con múltiples ramas paralelas que es capaz de adquirir conocimiento experimental y utilizarlo a posteriori. De esta manera, este método se basa en el entrenamiento de una red neuronal formada por un número determinado de neuronas artificiales que son entrenadas para relacionar unos datos de entrada con unos resultados. Así, este grupo de neuronas son tratadas como una “caja negra” que genera unos resultados a partir de unos datos de partida.

Este método no representa un método de cálculo en sí, sino que representa un proceso de tratamiento de datos basado en algún método de cálculo determinado, pero aún así me parece suficientemente interesante para mencionarlo en este texto.

3.- Implementación informática de la metodología de la estimación del rendimiento de un equipo solar prefabricado a largo plazo de acuerdo a la norma UNE-ISO 9459-2

En este capítulo se describe el método explicado en la norma ISO 9459-2 para el cálculo del rendimiento a largo plazo de los equipos solares. Las características del sistema se utilizan para determinar la energía solar mensual y anual de acuerdo a unas determinadas condiciones climáticas y de demanda.

El método de predicción definido es capaz de predecir la producción a la salida del sistema en función de los siguientes parámetros:

- Irradiación solar
- Temperatura del aire ambiente
- Temperatura del agua fría de red
- Volumen de carga
- Temperatura de la demanda de agua caliente

El objetivo del método es predecir a largo plazo el rendimiento del sistema con una precisión en torno a un $\pm 5\%$.

Método de cálculo día a día

El rendimiento del sistema se calcula para cada día del año sobre la base de datos climáticos del día y del volumen de agua caliente diariamente consumida, teniendo en cuenta la energía en el acumulador de días anteriores. La energía puede ser conservada de un día al otro, en caso de que solo un pequeño volumen de agua se haya extraído durante el día, o porque ocurrió una mezcla en el acumulador durante la extracción. Una parte de esta energía se perderá durante la noche como consecuencia de las pérdidas de calor del acumulador, pero aún es probable que al inicio del día siguiente el sistema de acumulación tenga una temperatura inicial superior a la temperatura del agua fría de red.

La única suposición en el procedimiento de cálculo diario es que si el agua en el acumulador se encuentra a una temperatura superior a la temperatura del agua fría al comienzo del día (debido a la conservación de energía del día anterior), entonces esta energía se mezcla al volumen del acumulador al inicio del nuevo día, de modo que el acumulador esté siempre a una temperatura uniforme al inicio de cada día.

El procedimiento de cálculo utiliza los datos obtenidos de los ensayos de rendimiento del sistema. Por lo tanto, las predicciones se aplican sólo para una sola extracción a las 6 horas después del mediodía solar. El rendimiento del sistema a largo plazo se calcula sumando el rendimiento del sistema para cada día sobre el período total de días considerados.

La producción del sistema para cualquier período determinado es la suma de las salidas diarias de energía:

Ecuación 1 $Q = Q_{c(1)} + Q_{c(2)} + \dots + Q_{c(n)}$

Son necesarios los siguientes **datos de ensayo**:

- a) Las características de producción total de energía del sistema determinadas a partir de los ensayos como una función de la irradiación diaria y de la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura del agua fría:

Ecuación 2 $Q = a_1 H + a_2 (t_{a(\text{day})} - t_{\text{main}}) + a_3$

- b) El perfil de la temperatura de extracción, expresada como una función de volumen $f(V)$ y normalizada de tal manera que el área englobada por la gráfica de perfil de extracción sea igual a 1:

Ecuación 3 $\int_0^{\infty} f(V) dV = 1$

- c) El valor de $f(V)$ es conocido para cada décima parte del volumen del acumulador.
d) Se debe determinar los perfiles de temperaturas de extracción para diferenciar entre los rangos de irradiación, por ejemplo, de 9 MJ/m² a 15 MJ/m² (día nublado) y de 16 MJ/m² a 25 MJ/m² (día soleado).
e) El perfil de mezcla de extracción, expresada como una función de volumen $g(V)$ y normalizada de tal manera que el área englobada por la curva de perfil de extracción sea igual a 1:

Ecuación 4 $\int_0^{\infty} g(V) dV = 1$

El valor de $g(V)$ es conocido para cada décima parte del volumen del acumulador.

- f) El coeficiente de pérdidas de calor por el acumulador U_s , en W/K.

Son necesarios los siguientes **datos climáticos**:

- a) La radiación solar diaria sobre el plano del captador H , en MJ/m².
b) La temperatura ambiente promedio en el período de 6 horas antes del mediodía solar hasta las 6 horas después del mediodía solar para cada día, $t_{a(\text{day})}$.
c) El promedio de la temperatura ambiente durante la noche por la noche, $t_{a(\text{night})}$.
d) Las horas de sol para cada día del año.

Se tomará $t_{a(\text{day})} = t_{a(24 \text{ h})} + 2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $t_{a(\text{night})} = t_{a(24 \text{ h})} - 2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$t_{a(\text{day})}$ es la media de la temperatura ambiente medida a la largo del día de ensayo.

Son necesarios los siguientes **datos de uso del sistema**:

- a) El volumen de consumo diario de agua caliente, V_c , o el límite mínimo de temperatura útil para el consumo de agua caliente.
- b) La temperatura de entrada de agua fría, t_{main} , para cada día.

Para todos los cálculos se usará $\rho_w c_{pw} = 4180$.

Para Estocolmo, Davos, Wurzburg y Atenas se usa el año de referencia de ensayo. Estos datos están disponibles para todos los laboratorios de ensayo europeos a través de la red de SolarKeymark.

A partir de los datos horarios de radiación global G sobre un plano inclinado a 45° y de la temperatura ambiente se calculan los valores de irradiación solar diaria H (suma de $G \cdot \Delta t$) y la media diaria de la temperatura ambiente. Luego se usan valores de temperatura diurna (taday) igual al valor de la media de temperatura ambiente diaria $+2,5^\circ\text{C}$ y valores de temperatura nocturna (tanight) igual al valor de la media diaria $-2,5^\circ\text{C}$.

Cálculo para el día 1

A continuación indicamos los pasos a seguir para realizar los cálculos de predicción del día 1: Las condiciones para el día 1, son:

- Irradiación = $H(1)$
- Temperatura ambiente diurna promedia = $t_{a(\text{day})}(1)$
- Temperatura del agua fría = $t_{main}(1)$
- Volumen de extracción $VC(1)$ o temperatura límite de extracción = $t_h(1)$

El sistema comienza el día a la temperatura de agua fría de red, $t_{main}(1)$. Se extrae un volumen $V_c(1)$ a las 6 horas después del mediodía solar.

Paso 1: Cálculo de energía 6 h después del mediodía solar

La energía total contenida en el sistema a las 6 horas después del mediodía solar, $Q(1)$, se calcula utilizando la ecuación 2, con $t_{main} = t_{main}(1)$, $t_{a(\text{day})} = t_{a(\text{day})}(1)$ y $H = H(1)$

$$\text{Ecuación 5} \quad Q(1) = a_1 H(1) + a_2 (t_{a(\text{day})}(1) - t_{main}(1)) + a_3$$

Paso 2: Temperatura del agua caliente extraída

NOTA: Este paso es necesario sólo si la demanda en agua caliente tiene un límite en temperatura. Para una demanda en agua caliente limitada por el volumen, se omite el paso 2 y se continúa con el paso 3.

El perfil de temperatura del agua caliente extraída, en función del volumen, se calcula utilizando la ecuación de la energía instantánea durante la extracción de agua caliente, es decir:

$$\text{Ecuación 6} \quad t_d(V) = t_{\text{main}}(1) + \frac{Q(1)f(V)}{0.1V_S \rho_w c_{pw}}$$

El volumen consumido $V_c(1)$ se calcula determinando el volumen máximo por el cual t_d sigue siendo superior a la $t_h(1)$.

Paso 3: Energía extraída

La energía $Q_c(1)$, que contiene un volumen de extracción $V_c(1)$ (que puede no ser igual a la energía total contenida en el sistema) se calcula con la función $f(V)$ integrada de $V = 0$ a $V = V'$.

$$\text{Ecuación 7} \quad Q_c(1) = Q(1) \int_0^{V'} f(V) dV$$

Donde V' se determina por dos condiciones:

$$\text{Ecuación 8} \quad Q_c(1) \leq V_c \rho_w c_{pw} (t_{\text{carga}} - t_{\text{red}}) \quad \text{y} \quad \text{Ecuación 9} \quad V' \leq V_c$$

Paso 4: Energía que se queda en el acumulador

La energía que se queda en el acumulador Q_R se calcula como:

$$\text{Ecuación 10} \quad Q_R(1) = Q(1) - Q_c(1)$$

Paso 5: Energía perdida durante la noche

La energía perdida durante la noche se calcula utilizando el coeficiente de pérdidas de calor del acumulador. De ahí se puede determinar la energía que queda en el acumulador a la mañana siguiente. Se supone que por la mañana el acumulador ha vuelto a ser mezclado completamente y que el agua está a una temperatura uniforme t_s .

Esta temperatura t_s se calcula como:

$$\text{Ecuación 11} \quad t_s(2) = t_{\text{main}}(1) + \frac{Q_R(1) - Q_{LOS}}{C_{ACU}}$$

$$\text{Con } C_{ACU} = V_S \rho_w c_{pw} = V_S \frac{4180}{10^6} \text{ en MJ/K}$$

Donde Q_{LOS} es la pérdida en el acumulador por la noche.

Las pérdidas en el acumulador por la noche, Q_{LOS} , se calcula como:

$$\text{Ecuación 12} \quad Q_{LOS} = V_S \rho_w c_{pw} [t_i - t_{a(\text{night})}] \left[1 - \exp\left(-\frac{U_S \Delta t}{V_S \rho_w c_{pw}}\right) \right]$$

Donde t_i es la temperatura media del acumulador al comienzo de la noche y $t_{a(\text{night})}$ es la temperatura ambiente media durante la noche. t_i se calcula a partir del valor de Q_R :

Ecuación 13
$$t_i = \frac{Q_R(1)}{V_s \rho_w c_{pw}} + t_{main}(1)$$

Cálculo para el día 2 y los días siguientes

A continuación indicamos los pasos a seguir para realizar los cálculos de predicción del día 2 y los días sucesivos:

Las condiciones para el día 2, son:

- Irradiación = $H(2)$.
- Temperatura ambiente diurna promedia = $t_a(\text{day})(2)$.
- Temperatura del agua fría = $t_{main}(2)$.
- Volumen de extracción $V_c(2)$ o temperatura límite de extracción = $t_h(2)$.

El sistema comienza el día en la temperatura $t_s(2)$ como se calcula en el paso 5 del día 1. $t_s(2)$ tiene que ser mayor que $t_{main}(2)$. Se extrae un volumen $V_c(2)$ a las 6 horas después del mediodía solar.

Paso 1: Energía disponible a las 6 horas después del mediodía solar

Una parte de la energía disponible es la que se ha obtenido si el sistema se ha llenado durante la extracción de agua caliente a las 6 horas después del mediodía solar a la temperatura inicial del agua $t_s(2)$.

Esta energía se calcula con la Ecuación, con $t_{main} = t_s(2)$, $t_a(\text{day}) = t_a(\text{day})(2)$ y $H = H(2)$.

Ecuación 14
$$Q(2 : \text{part1}) = a_1 H(2) + a_2 (t_{a(\text{day})}(2) - t_s(2)) + a_3$$

La otra parte de la energía disponible se debe al hecho de que el sistema se ha llenado con agua a $t_{main}(2)$, que es inferior a $t_s(2)$. Esta energía está dada por el producto de la parte de la energía solar del acumulador y la diferencia entre $t_s(2)$ y $t_{main}(2)$.

Ecuación 15
$$Q(2 : \text{part2}) = V_s \rho_w c_{pw} (t_s(2) - t_{main}(2))$$

Como resultado obtenemos la energía total disponible según la siguiente expresión:

Ecuación 16
$$Q(2) = Q(2 : \text{part1}) + Q(2 : \text{part2})$$

Paso 2: Volumen de extracción para alcanzar el límite de temperatura mínima

NOTA: Este paso es necesario sólo si la demanda en agua caliente tiene un límite en temperatura. Para una demanda en agua caliente limitada por el volumen, se omite el paso 2 y se continúa con el paso 3.

El perfil de temperatura del agua caliente en función del volumen se calcula utilizando la Ecuación 17. Calculando el perfil de temperatura, es necesario considerar las dos contribuciones de energía $Q(2:part1)$ y $Q(2:part2)$.

$$\text{Ecuación 17} \quad t_d(V) = t_{main}(2) + \frac{Q(2:part1)f(V)}{0.1V_S \rho_w c_{pw}} + \frac{Q(2:part2)g(V)}{0.1V_S \rho_w c_{pw}}$$

El volumen consumido $V_c(2)$ se calcula determinando el volumen máximo a la temperatura t_d , como se ha calculado en la Ecuación 17, que sigue mayor que $t_h(2)$.

Paso 3: Energía extraída

Una parte de la energía obtenida en el volumen de extracción $V_c(2)$ es $Q(2:part1)$, la energía que se entregó si el sistema se ha llenado con agua a la temperatura inicial $t_s(2)$. Basándonos en la energía que se ha determinado en el paso 1, se utiliza la función $f(V)$, integrada de $V = 0$ a $V' = V_c(2)$.

$$\text{Ecuación 18} \quad Q_C(2:part1) = Q(2:part1) \int_0^{V'} f(V) dV$$

La otra parte de la energía que está extraída del volumen consumido $V_c(2)$ se calcula usando el perfil de mezcla, $g(V)$:

$$\text{Ecuación 19} \quad Q_C(2:part2) = Q(2:part2) \int_0^{V'} g(V) dV$$

El valor de V' se determina cuando se calcula la energía total extraída de acuerdo a:

$$\text{Ecuación 20} \quad Q_C(2) = Q_C(2:part1) + Q_C(2:part2) \leq V_C \rho_w c_{pw} (t_{carga} - t_{red})$$

$$\text{Y Ecuación 21} \quad V' \leq V_C$$

Paso 4: Energía que se queda en el acumulador

El total de la energía que se queda en el acumulador al final del día 2 se calcula como:

$$\text{Ecuación 22} \quad Q_R(2) = Q(2) - Q_C(2)$$

Paso 5: Energía perdida durante la noche

La energía perdida durante la noche se puede calcular utilizando el coeficiente de pérdidas de calor en el acumulador. De ahí se puede determinar la energía que queda en el acumulador a la mañana siguiente. Se supone que por la mañana el acumulador ha vuelto a ser mezclado completamente y que el agua está a una temperatura uniforme t_s .

Esta temperatura t_s se calcula como:

$$\text{Ecuación 23} \quad t_s(3) = t_{\text{main}}(2) + \frac{Q_R(2) - Q_{\text{LOS}}}{C_{\text{ACU}}}$$

Donde QLOS son las pérdidas en el acumulador por la noche.

Las pérdidas en el acumulador por la noche, QLOS, se calcula como:

$$\text{Ecuación 24} \quad Q_{\text{LOS}} = V_S \rho_w c_{pw} \left[t_i - t_{a(\text{night})} \right] \left[1 - \exp \left(- \frac{U_S \Delta t}{V_S \rho_w c_{pw}} \right) \right]$$

Donde t_i es la temperatura media del acumulador al comienzo de la noche y $t_{a(\text{night})}$ es la temperatura ambiente media durante la noche. t_i se calcula a partir del valor de Q_R calculado en la Ecuación 22:

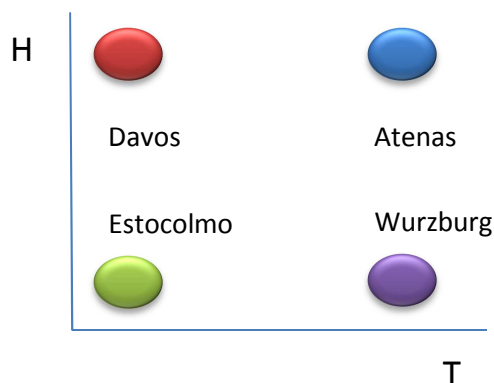
$$\text{Ecuación 25} \quad t_i = \frac{Q_R(2)}{V_S \rho_w c_{pw}} + t_{\text{main}}(2)$$

Paso 6: Días siguientes

El procedimiento empieza de nuevo para los días siguientes del 3 al 365, repitiendo los pasos realizados en el día 2.

3.1.- Comparación con la metodología acreditada

A continuación se expone una comparación entre la metodología acreditada llevada a cabo con anterioridad en otro trabajo y los resultados obtenidos tras implementar en el software Microsoft Excel el método de cálculo descrito en el punto anterior. La elección de las cuatro localizaciones se hace atendiendo a sus condiciones climáticas, buscando la mayor disparidad de condiciones de irradiación (H) y temperatura (T), de forma que se cubran las cuatro esquinas de la siguiente ilustración:



Ciudad	Q acreditada [MJ]	Q [MJ]	V carga Diaria [l]	% diferencia
Stockholm	1344	1223,46	50	10%
Wuzburg	1455	1404,02	50	4%
Davos	2169	1502,91	50	44%
Atenas	1800	1996,35	50	10%
Stockholm	2064	2182,98	80	5%
Wuzburg	2249	2502,78	80	10%
Davos	3312	2698,65	80	23%
Atenas	2798	3616,00	80	23%
Stockholm	2736	2587,00	110	6%
Wuzburg	2996	2965,70	110	1%
Davos	4368	3203,55	110	36%
Atenas	3752	4299,68	110	13%
Stockholm	3301	3239,72	140	2%
Wuzburg	3637	3720,79	140	2%
Davos	5244	4016,88	140	31%
Atenas	4597	5390,30	140	15%
Stockholm	3740	3461,03	170	8%
Wuzburg	4153	3980,00	170	4%
Davos	5893	4291,31	170	37%
Atenas	5313	5745,74	170	8%
Stockholm	4006	3978,90	200	1%
Wuzburg	4507	4574,57	200	1%
Davos	6220	4966,35	200	25%
Atenas	5862	6604,10	200	11%
Stockholm	4208	3845,99	250	9%
Wuzburg	4795	4425,65	250	8%
Davos	6448	4785,53	250	35%
Atenas	6578	6376,30	250	3%
Stockholm	4298	3942,57	300	9%
Wuzburg	4894	4534,01	300	8%
Davos	6576	4917,42	300	34%
Atenas	7064	6544,44	300	8%
Stockholm	4408	4049,57	400	9%
Wuzburg	5016	4652,55	400	8%
Davos	6739	5067,58	400	33%
Atenas	7406	6730,50	400	10%
Stockholm	4508	4165,64	600	8%
Wuzburg	5128	4776,17	600	7%
Davos	6886	5246,97	600	31%
Atenas	7567	6933,70	600	9%

Tabla 1. Relación de Q acreditada frente a la Q calculada para el equipo 4

Ciudad	Q acreditada [MJ]	Q [MJ]	V carga Diaria [l]	% diferencia
Stockholm	1309	1022,61	50	28%
Wuzburg	1422	1182,63	50	20%
Davos	2149	1244,33	50	73%
Atenas	1793	1654,60	50	8%
Stockholm	2069	1916,00	80	8%
Wuzburg	2251	2209,88	80	2%
Davos	3391	2346,58	80	45%
Atenas	2846	3157,41	80	10%
Stockholm	2793	2710,60	110	3%
Wuzburg	3047	3123,00	110	2%
Davos	4565	3328,80	110	37%
Atenas	3859	4512,20	110	14%
Stockholm	3459	3394,87	140	2%
Wuzburg	3790	3908,99	140	3%
Davos	5643	4169,84	140	35%
Atenas	4812	5666,27	140	15%
Stockholm	4062	3954,51	170	3%
Wuzburg	4466	4554,83	170	2%
Davos	6610	4853,09	170	36%
Atenas	5696	6596,39	170	14%
Stockholm	4581	4403,05	200	4%
Wuzburg	5060	5075,81	200	0%
Davos	7425	5394,92	200	38%
Atenas	6498	7328,22	200	11%
Stockholm	5226	4933,87	250	6%
Wuzburg	5846	5694,71	250	3%
Davos	8338	6046,67	250	38%
Atenas	7616	8203,28	250	7%
Stockholm	5639	5767,61	300	2%
Wuzburg	6399	6652,16	300	4%
Davos	8830	7112,34	300	24%
Atenas	8501	9627,65	300	12%
Stockholm	6057	5552,16	400	9%
Wuzburg	6938	6403,93	400	8%
Davos	9379	6833,21	400	37%
Atenas	9918	9271,68	400	7%
Stockholm	6452	5980,56	600	8%
Wuzburg	7384	6888,97	600	7%
Davos	9977	7399,06	600	35%
Atenas	11038	10022,08	600	10%

Tabla 2. Relación de Q acreditada frente a la Q calculada para el equipo 11

Se aprecia en ambos casos que los resultados se parecen ostensiblemente, con diferencias inferiores al 10% en la mayoría de los casos. Se aprecia un error recurrente grande en el caso de Davos. Si se miran los resultados detenidamente se puede ver una mayor producción para Davos que para Atenas en el caso de la metodología acreditada, lo cual sugiere que hay un error de cálculo en ese método porque eso no responde a la lógica teniendo en cuenta las

condiciones climáticas de ambas localizaciones. Este hecho fue comentado con el director del proyecto, el cual coincide en este aspecto.

Las otras variaciones con toda probabilidad se deben a que el método implementado para realizar los cálculos para el presente trabajo está más afinado que el llevado a cabo en el otro método. Y también al uso de datos más reales con respecto a las horas de luz de cada localización.

4.- Definición de parámetros y equipos analizados para las diferentes zonas climáticas

A lo largo de este breve capítulo se definen los parámetros que se modifican en el análisis de sensibilidad, así como las condiciones sobre las que se lleva a cabo dicho análisis. Los resultados del citado análisis se ven reflejados en el anexo 4 del presente documento. Todos los equipos son termosifónicos.

Los equipos analizados son tres: el equipo nº 4, el equipo nº 11 y un equipo ficticio cuyos parámetros vienen determinados por la media de los parámetros de los veintiún equipos ensayados y de los cuales se tienen datos, que son, respectivamente, el considerado uno de los mejores equipos, uno de los peores, y el medio en función de los parámetros U_s y a_i , respectivamente. Los datos técnicos de los equipos utilizados se encuentran reflejados en el anexo 2 del documento.

Para diferenciar los equipos 4 y 11 como uno de los mejores y uno de los peores respectivamente se clasificaron según U_s los 21 equipos de los cuales se disponían datos. A continuación se identificaron los mejores (menores U_s) y peores (mayores U_s). Tras esta clasificación se diferencia entre los equipos considerados como mejores o peores buscando cuáles de ellos tienen la combinación de a_i mejor y peor respectivamente. La mejor combinación de a_i será:

- Mayor a_1
- Mayor a_2
- Mayor a_3

Dado que los tres parámetros aparecen sumando en la Ecuación 5 que determina la energía absorbida según la gráfica Q-H. Por lo tanto la peor será en la cual los tres a_i sean menores.

Los mejores equipos se representan a continuación:

Nº equipo	U_s [W/K]	a_1 [MJ/m ²]	a_2 [MJ/K]	a_3 [MJ]
4	3,34	1,21	0,45	-1,06
13	3,23	1	0,27	-0,61

Tabla 3. Mejores equipos según U_s

Los peores equipos se representan a continuación:

Nº equipo	Us[W/K]	a1[MJ/m2]	a2[MJ/K]	a3[MJ]
6	6,09	1,6	0,74	-1,7
11	5,07	1,86	0,75	-2,42

Tabla 4. Peores equipos según Us

Cualquier pareja de mejor y peor equipo hubiera servido ya que se busca analizar uno de los peores equipos y uno de los mejores, no específicamente el mejor y el peor. Se eligieron los equipos 4 y 11 como representantes de los mejores y los peores respectivamente. Estos equipos presentan las siguientes características:

Equipo	Tipo de captador	Área Apertura (m2)	Volumen (l)	V/A (l/m2)	Espesor aislamiento acumulador (mm)	Modelo de intercambiador ¹ / Aintercambio (m2)	Presión 1º (bar)
4	Plano selectivo	2,30	192	83,48	40	D / 1,16	3
11	Plano selectivo	3,84	300	78,13	50	D / 1,67	2,5

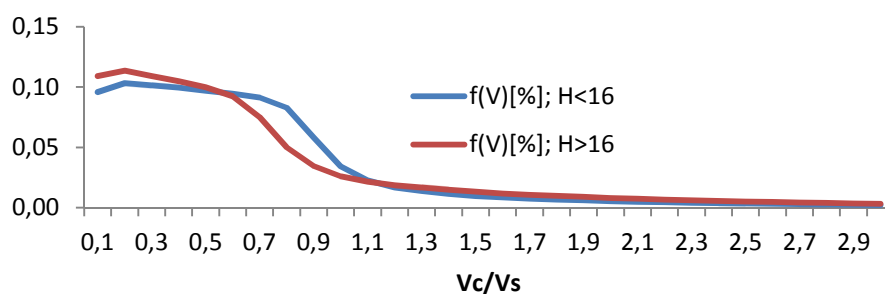
Tabla 5. Características técnicas de los equipos 4 y 11

Mientras que el equipo modelizado como la media de los 21 equipos tendrá las siguientes características:

Us[W/K]	a1[MJ/m2]	a2[MJ/K]	a3[MJ]
4,29	1,35	0,46	-1,43

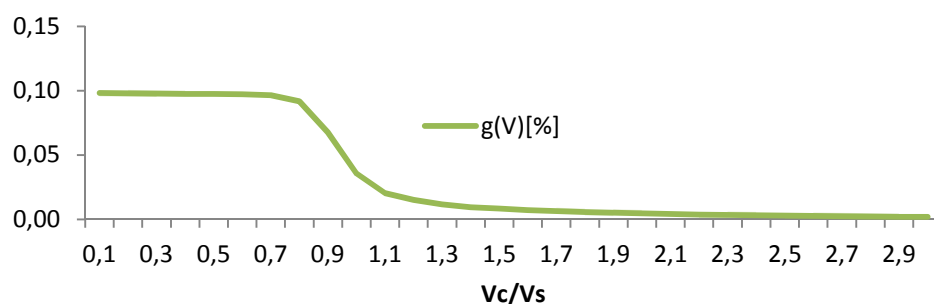
Tabla 6. Parámetros característicos del equipo medio

A continuación se muestran los perfiles f(V) y g(V) de los equipos 4, 11 y medio:

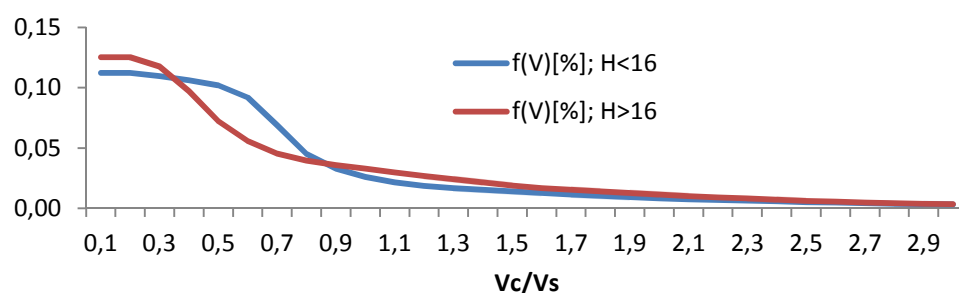


Gráfica 1. Perfiles f(V) para H<16MJ/m2 y H>16MJ/m2 para el equipo 4

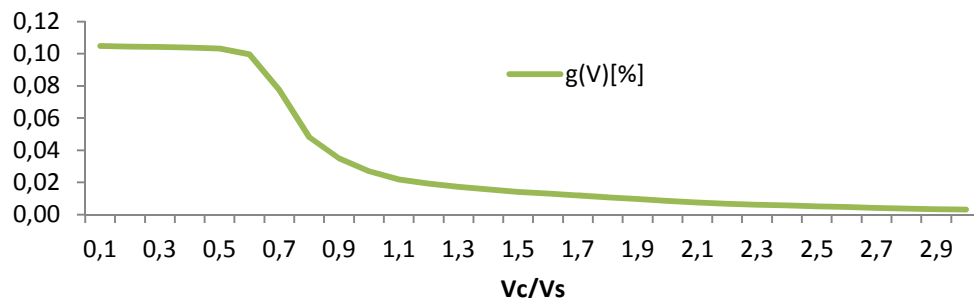
¹ D para intercambiadores de doble envolvente



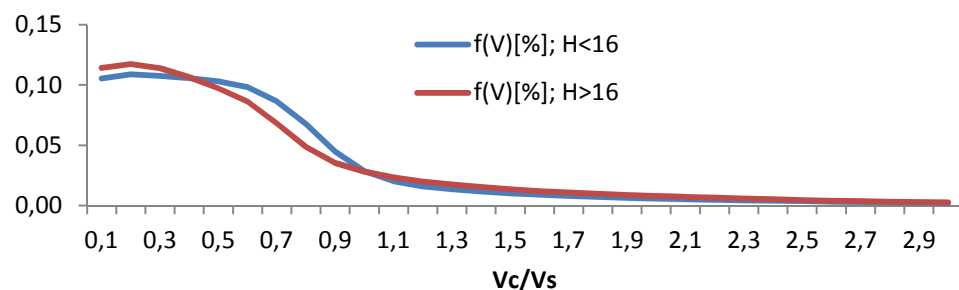
Gráfica 2. Perfil g(V) para el equipo 4



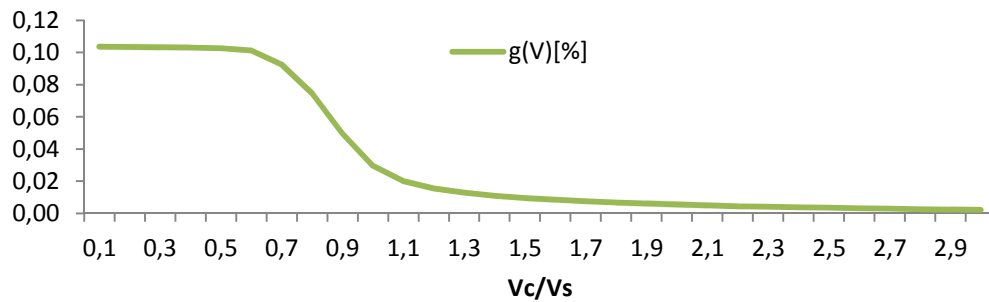
Gráfica 3. Perfiles f(V) para H<16MJ/m2 y H>16MJ/m2 para el equipo 11



Gráfica 4. Perfil g(V) para el equipo 11



Gráfica 5. Perfiles f(V) para H<16MJ/m2 y H>16MJ/m2 para el equipo medio

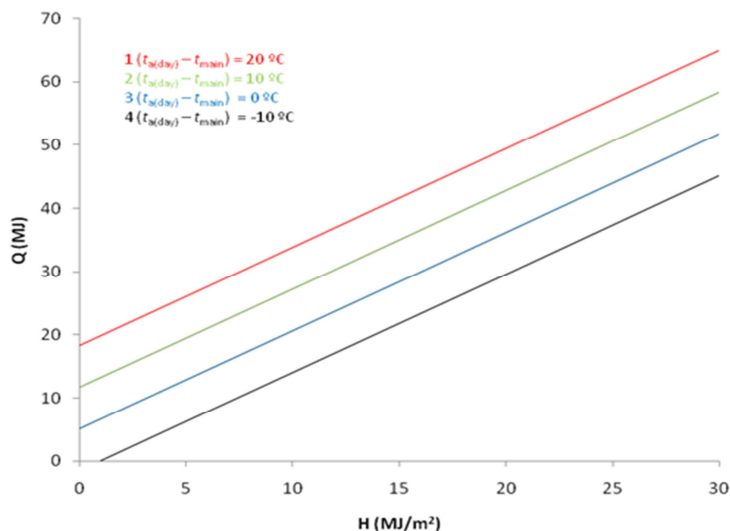


Gráfica 6. Perfil $g(V)$ para el equipo medio

Para cada análisis de sensibilidad se simula la producción de energía térmica para cada sistema en cada una de las localizaciones de referencia, y posteriormente se elaboran unas gráficas en las cuales se representa la tendencia de la producción ante esa variación de cada parámetro. Se incluye también la representación de la fracción solar en función de los valores del parámetro analizado. Cada uno de los parámetros analizados viene definido a continuación:

- Gráfica Q-H: Es una gráfica experimental que relaciona la irradiación H (energía incidente) con la energía absorbida. Está formada por tres parámetros: $Q = a_1 \cdot H + a_2 \cdot (t_{aire} - t_{agua\ entrante}) + a_3$. Los tres coeficientes se obtienen de forma experimental por un ajuste de mínimos cuadrados, ya que se pueden medir $Q (Q = m \cdot C_e \cdot \Delta t) [MJ]$ y $H [MJ/m^2]$.

A continuación se expone un ejemplo de esta gráfica:



Gráfica 7. Ejemplo de gráfica Q-H

Estos parámetros se verán modificados en un $\pm 50\%$ de su valor original para hacer el análisis.

- Coeficiente U_s : El parámetro U_s determina las pérdidas térmicas que tiene el acumulador durante la noche. Este parámetro está directamente relacionado con la

forma constructiva del acumulador, es decir, con la forma que tenga (si tiene más o menos superficie) y con su tamaño y capacidad, así como con el aislante utilizado, y su grosor. Este parámetro se calcula de forma experimental con una expresión que relaciona la diferencia de temperaturas al final y al principio de la noche, la masa de agua y la duración de la noche. A continuación se detalla la expresión utilizada para el cálculo de U_s :

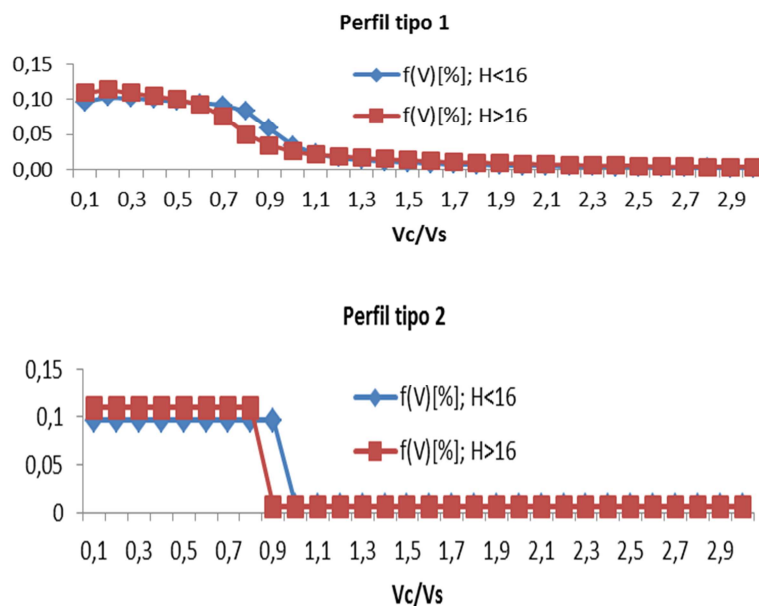
$$\text{Ecuación 26} \quad U_s = \frac{\rho_w * c_{pw} * V_s}{\Delta t} \ln \left[\frac{t_i - t_{as}}{t_f - t_{as}} \right]$$

Al igual que los parámetros a_i , este coeficiente se verá modificado en un $\pm 50\%$ de su valor original para hacer el análisis:

- Perfiles $f(V)$ y $g(V)$: Estos perfiles ilustran la cantidad de energía que hay contenida en cada porción de volumen del acumulador, es decir, ilustran la cantidad de energía que sale en cada litro de agua extraído del acumulador en forma de porcentaje (en este caso vienen definidos por décimos del volumen del acumulador). Mientras $f(V)$ se relaciona con la energía disponible por el calentamiento a través del panel, $g(V)$ se relaciona con la energía disponible por la mezcla de agua templada (agua a principio del día) con agua fría (agua de red). Estos perfiles se relacionan con el equipo globalmente.

En el caso de los perfiles de extracción, se ha realizado el análisis comparando el perfil actual que cada equipo tiene frente al perfil ideal de extracción, en el cual la pendiente descendente se transforma en un escalón de manera que se optimiza la energía extraída al extraer la mayor parte al principio, como en las gráficas ejemplo (Gráfica 8). De esta forma, por pequeño que sea V_c siempre extraes la máxima energía.

Ambos perfiles se determinan a través de los ensayos descritos en la norma ISO 9459-2[1]. Para el caso de $f(V)$ se determinan dos perfiles, uno para $H < 16 \text{ MJ/m}^2$ y otro para $H > 16 \text{ MJ/m}^2$, uno para día nublado y otro para día soleado respectivamente. A continuación se detallan unas gráficas ejemplo de la optimización del perfil $f(V)$:



Gráfica 8. Gráficas ejemplo de la optimización de los perfiles $f(V)$.

El escalón se sitúa allí donde el perfil original tiene una mayor pendiente. En el caso de los perfiles de $g(V)$, las gráficas son completamente análogas.

Para cada uno de los análisis se ha tenido en cuenta la influencia del volumen de consumo, así hay datos para un rango de volúmenes de consumo desde los 50 litros hasta los 600. En el caso del equipo nº 4 esto representa un mayor volumen proporcionalmente debido a que el volumen de su acumulador es menor, pero se ha optado por operar según demanda constante e igual para todos los equipos.

También se representa la relación entre la variación de cada parámetro y la fracción solar. La fracción solar f_{sol} es la energía suministrada por la parte solar del sistema dividida por la carga total del sistema $f_{sol} = Q/Q_d^2$

² Q_d determinada según UNE-EN 12976-2 Apartado 5.8.3.3.

5.- Conclusiones

5.1.- Sobre la norma:

Tras el estudio e interpretación de la norma se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- En el método de cálculo día a día aparecen algunas inconsistencias:
 - Algunos de los parámetros no están acotados, es decir, que alguna de las magnitudes puede tomar valores menores que 0 por la naturaleza de las fórmulas que las determinan, pero ese valor negativo no tiene sentido físico, así que a la hora de calcular se debe dejar en 0. Estas magnitudes son:
 - o Q1: no puede ser menor que 0 porque es un parámetro de energía absorbida, será como mínimo 0, pero nunca menor.
 - o Q2: análogo a Q1.
 - Asimismo, algunos valores no pueden ser mayores que otros físicamente, mientras que según sus fórmulas si cabe la posibilidad. Estos parámetros son:
 - o t_i : La T^a del acumulador al comienzo de la noche no será más fría que la T^a ambiente nocturna ($t_{a\text{ night}}$).
 - o Qlos: Las pérdidas nocturnas del acumulador nunca serán mayores que la energía que quede tras la extracción (Qr).

5.2.- Sobre los equipos:

Tras la comparación de las características técnicas de los equipos con sus parámetros experimentales se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- Sobre a_1 :
 - o Equipos grandes³ presentan los mejores valores. La proporción V/A para estos equipos debe ser entre 70-80 l/m².
 - o Equipos medianos⁴ pueden presentar buen a_1 si tienen una proporción V/A adecuada, en torno a 90 l/m².
 - o Equipos pequeños⁵ presentan malos a_1 .
 - o Queda favorecido por un aumento del área de intercambio en el acumulador.

Así que para optimizar a_1 se busca un equipo lo mayor posible respetando la relación V/A óptima para cada tamaño y con un área de intercambio en el acumulador la máxima posible.

³ Equipos grandes son aquellos con un volumen entre 280-300 l y un área de apertura mayor de 3,8 m²

⁴ Equipos medianos son aquellos con un volumen de 200 l y un área de apertura en torno a 2 m²

⁵ Equipos pequeños son aquellos con un volumen menor de 200 l y un área de apertura menor de 2 m²

- Sobre a2:
 - o Se comporta análogamente con a1.
- Sobre a3:
 - o Los equipos medianos presentan los peores a3, mientras que en los pequeños y en los grandes a3 mejora si V/A está en torno a 80 l/m2.
 - o A mayor área de apertura, mejores valores de a3.

Para optimizar a3 buscaré un equipo lo mayor posible respetando la relación V/A alrededor de 80 l/m2, y con un área de apertura también la mayor posible. Un equipo pequeño también será una buena opción manteniendo la relación V/A en torno a 80 l/m2.

- Sobre Us:
 - o Cuanto más pequeño sea el equipo mejor Us.
 - o Cuanto más espesor de aislamiento mejor Us.
 - o Influye más el tamaño que el espesor de aislamiento.

Para optimizar Us por tanto se buscará que el acumulador sea lo más pequeño posible. En cualquier caso el espesor del aislamiento debería ser el máximo posible.

5.3.- Sobre los resultados del análisis de sensibilidad:

Tras la elaboración de los cálculos y el plasmado, en forma de gráficas, de los resultados se han podido obtener las siguientes conclusiones.

En primer lugar, del estudio del apartado “Anexo 4.1.- Frente a variaciones de la gráfica Q-H”, se han podido extraer las siguientes conclusiones:

Sobre a1:

- Tiene una influencia muy fuerte sobre la producción final para todo clima y consumo.
- En el caso de Atenas y un consumo pequeño no hace falta un alto a1 ya que se cubre el 100% de fracción solar. En los meses de verano habrá que proteger los equipos ante sobrepresiones, cubriéndolos por ejemplo.
- La influencia de a1 es más importante en el clima presente en la ciudad de Davos.

Sobre a2:

- La influencia del parámetro a2 es muy diferente en función del consumo diario.
- Para bajos consumos, mejor un a2 pequeño, para consumos altos mejor un a2 grande. En Davos no cambia de signo, mejor cuanto más pequeño.
- La influencia es sustancialmente mayor en el caso de Davos.
- En Estocolmo la influencia debería ser parecida a Davos, pero se capta tan poco, que $Q_1=0$ y por tanto a2 pierde importancia.

Sobre a_3 :

- La influencia del parámetro a_3 es casi la misma para los tres equipos y las cuatro condiciones climáticas, además su influencia es casi constante en función del consumo.

Del estudio del apartado “Anexo 4.2.- Frente a variaciones del perfil $f(V)$ ”, se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- La influencia de la forma del perfil de extracción $f(V)$ es muy pequeña.
- Su influencia es apreciable cuando el consumo se sitúa en el umbral de cambio del perfil, lo cual es lógico porque se aprovecha al máximo la meseta inicial del perfil.
- Para altos consumos, el perfil ideal acaba perjudicando a la producción de energía térmica porque los valores inferiores del perfil optimizado van por debajo de los del perfil real y por tanto la integral es menor. Puesto que la energía inicial no es más valiosa para el caso de gran consumo, no merece la pena.
- El perfil que presentan los equipos es muy parecido al ideal, por eso las diferencias son mínimas

Del estudio del apartado “4.3.- Frente a variaciones del perfil $g(V)$ ”, se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- La influencia de este perfil es prácticamente nula para los tres equipos y para las cuatro condiciones climáticas. Esto es debido a que el perfil real y el ideal son prácticamente iguales.

Del estudio del apartado “Anexo 4.4.- Frente a variaciones del coeficiente U_s ”, se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- La influencia del coeficiente de pérdidas térmicas U_s es menor conforme aumenta el consumo diario. Ésta es muy pequeña para altos consumos. Esto es debido a que tales altos consumos llevan a la extracción diaria de la totalidad, o casi la totalidad de la energía absorbida, la cual ya no se perderá por el hecho de que no se almacenará.
- Para consumos pequeños la influencia es apreciable tomando valores del 5% al 10%, aún así, los a_i son más influyentes.
- En el caso del clima de Davos la influencia del aislamiento es mayor, ya que será mayor la energía que se almacene, y te enfrentas a temperaturas ambientales muy bajas. A pesar de las temperaturas ambiente tan frías de Estocolmo, la influencia de estas es menor porque se almacena menos energía que en Davos.

A nivel global se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- La influencia de la gráfica Q-H es mucho mayor que la de cualquiera de los otros parámetros analizados, siendo el parámetro a_1 mucho más influyente que los otros dos.

- La influencia del parámetro a_2 no es clara a priori ya que puede ayudar o perjudicar según el balance de temperaturas (T^a durante el día – T^a del agua del equipo tras la noche).
- Una alta absorción de energía de los equipos puede llevar a problemas en el caso de un clima como el de Atenas y un consumo bajo o moderado, en el cual se presenta un exceso de energía que generará sobrepresiones en los equipos. Para los otros climas esto no es un condicionante.
- Para los tres equipos la influencia de las variaciones de los parámetros es casi idéntica.
- Los perfiles de extracción influyen poco o nada en la producción de energía térmica. Su optimización solo se apreciaría en el caso de consumos específicos, y en el caso de $g(V)$ ni siquiera eso.
- Es más importante la cantidad de energía que guardas dentro del acumulador, que las condiciones externas, así, a pesar de las bajas temperaturas de Estocolmo, Davos presenta las condiciones en las que U_s es más influyente.

5.4.- Selección de equipos óptima según condiciones climáticas y consumo:

Tras la combinación del análisis de sensibilidad llevado a cabo y de la relación de los parámetros experimentales con las características técnicas de los equipos he establecido unos criterios para intentar optimizar la selección de equipos en función de las condiciones climatológicas y del consumo.

- Atenas: Presenta unas condiciones de altas temperaturas y alta irradiación. Según el consumo estos son los criterios de selección:
 - o Bajo⁶: Se alcanza sobradamente el 100 % de fracción solar, por lo que no son necesarios unos buenos coeficientes a_i ni U_s , así que buscaría el equipo más barato con más pequeño y con menos mantenimiento posible aunque tuviera malas prestaciones, manteniendo una relación V/A apropiada entre 70-90 l/m². Escogería el equipo 9, que presenta estas características:

Nº equipo	U_s	a_1	a_2	a_3	Área Apertura(m ²)	Volumen (l)	V/A (l/m ²)	Espesor aislamiento (mm)	Aint (m ²)
9	3,49	0,77	0,29	-0,57	1,8	145	80,56	40	0,98

⁶ Consumo bajo es aquel menor de 150 l/día.

- Medio⁷: Ya no se alcanza el 100 % de fracción solar. Interesa que:
 - a1 sea bueno sin necesidad de que sea muy bueno.
 - a2 en torno a un valor medio.
 - a3 sea máximo.
 - Mínimo Us.

Por esto buscaría un equipo:

- Con volumen de acumulación en torno a 250 l. con una relación V/A en torno a 90 l/m² pero lo menor posible escogiendo un área de apertura lo mayor posible, alrededor de 2,8 m².
- Escogería un acumulador con la mayor área de intercambio posible y un aislamiento máximo.

Escogería el equipo 10, que presenta estas características:

Nº equipo	Us	a1	a2	a3	Área Apertura(m ²)	Volumen (l)	V/A (l/m ²)	Espesor aislamiento (mm)	Aint (m ²)
10	4,25	1,75	0,51	-0,21	4	282	70,5	50	0,9

- Alto⁸: Us pierde su influencia, y a1 cobra más importancia que todo lo demás. Interesa que:
 - a1, a2 y a3 sean lo mayor posible.

Por esto buscaría un equipo:

- Lo mayor posible, con un volumen de acumulación en torno a 300 l. y una relación V/A en torno a 75 l/m² pero lo menor posible escogiendo un área de apertura lo mayor posible, alrededor de 4 m².
- Un acumulador con un área de intercambio lo mayor posible.

Escogería el equipo 3, que presenta estas características:

Nº equipo	Us	a1	a2	a3	Área Apertura(m ²)	Volumen (l)	V/A (l/m ²)	Espesor aislamiento (mm)	Aint (m ²)
3	4,72	1,98	0,53	-1,97	4,32	287	66,44	50	2,19

⁷ Consumo medio es aquel entre 150 y 300 l/día.

⁸ Consumo alto es aquel mayor de 300 l/día.

- Davos: Presenta unas condiciones de bajas temperaturas y alta irradiación. Según el consumo estos son los criterios de selección:
 - o Bajo: Solo en Atenas se alcanza el 100% para todos los casos. En este caso hay que prestar más atención a la elección de características. Interesa que:
 - a1 y a3 sean lo mayor posible.
 - a2 y Us sean lo menor posible.

La optimización de a1 perjudica a otros objetivos de optimización, pero a1 es el que más peso tiene. Por esto buscaría un equipo:

- Con un volumen de acumulación en torno a 200 l. con una relación V/A en torno a 90 l/m² y con un área de apertura en torno a 2,25-2,5 m².
- Un acumulador con los mayores área de intercambio y aislamiento posibles.

Escogería el equipo 4, que presenta estas características:

Nº equipo	Us	a1	a2	a3	Área Apertura(m2)	Volumen (l)	V/A (l/m2)	Espesor aislamiento (mm)	Aint (m2)
4	3,34	1,21	0,45	-1,06	2,3	192	83,48	40	1,16

- o Medio: El aislamiento va perdiendo importancia, pero los criterios son los mismos que para un bajo consumo:
 - a1 y a3 sean lo mayor posible.
 - a2 y Us sean lo menor posible.

En este caso elegiría un equipo:

- Con un volumen de acumulación en torno a 250 l. y una relación V/A en torno a 90 l/m², escogiendo un área de apertura lo mayor posible, en torno a 2,8 m².
- Escogería un acumulador con la mayor área de intercambio posible y un aislamiento máximo.

Escogería el equipo 10, que presenta estas características:

Nº equipo	Us	a1	a2	a3	Área Apertura(m2)	Volumen (l)	V/A (l/m2)	Espesor aislamiento (mm)	Aint (m2)
10	4,25	1,75	0,51	-0,21	4	282	70,5	50	0,9

- o Alto: El comportamiento es parecido al de Atenas, con la salvedad de a2, a1 cobra mucha importancia y Us la pierde toda. Interesa que:
 - a1 y a3 sean lo mayor posible.
 - a2 sea lo menor posible.

A pesar de que optimizar a1 en este caso perjudicaría a a2, es lo más conveniente. En este caso elegiría un equipo:

- Lo mayor posible, con un volumen de acumulación en torno a 300 l. y una relación V/A en torno a 75 l/m² pero lo menor posible escogiendo un área de apertura lo mayor posible, alrededor de 4 m².
- Un acumulador con un área de intercambio lo mayor posible.

Escogería el equipo 3, que presenta estas características:

Nº equipo	Us	a1	a2	a3	Área Apertura(m ²)	Volumen (l)	V/A (l/m ²)	Espesor aislamiento (mm)	Aint (m ²)
3	4,72	1,98	0,53	-1,97	4,32	287	66,44	50	2,19

- Estocolmo: Presenta unas condiciones de bajas temperaturas y baja irradiación. Según el consumo estos son los criterios de selección:
 - Bajo: Nos encontramos ante una situación similar al caso de bajo consumo en Davos, ya que interesa optimizar los mismos parámetros, así que las directrices de elección serían las mismas.
 - Medio: Nos encontramos ante una situación similar al caso de medio consumo en Atenas, ya que interesa optimizar los mismos parámetros, así que las directrices de elección serían las mismas.
 - Alto: Nos encontramos ante una situación similar al caso de alto consumo en Atenas, ya que interesa optimizar los mismos parámetros, así que las directrices de elección serían las mismas.
- Wurzburg: Presenta unas condiciones de altas temperaturas y baja irradiación. Según el consumo estos son los criterios de selección:
 - Bajo: Nos encontramos ante una situación similar al caso de bajo consumo en Davos, ya que interesa optimizar los mismos parámetros, así que las directrices de elección serían las mismas.
 - Medio: Nos encontramos ante una situación similar al caso de medio consumo en Atenas, ya que interesa optimizar los mismos parámetros, así que las directrices de elección serían las mismas.
 - Alto: Nos encontramos ante una situación similar al caso de alto consumo en Atenas, ya que interesa optimizar los mismos parámetros, así que las directrices de elección serían las mismas.

La elección del equipo óptimo garantiza que ese equipo captará y ofrecerá el máximo de energía posible para cada condiciones climáticas y de consumo, no quiere decir que garantice una cobertura total de la demanda.

6.- Referencias

- [1] ISO 9459-2:1995. Calentamiento solar. Sistemas de calentamiento de agua sanitaria. Parte 2: Métodos de ensayo.
- [2] Vera Medina, J., 2011. Estudio comparativo de sistemas solares térmicos ensayados por la UNE 12976. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla
- [3] Beckman, W., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1977. Solar Heating Design by the f-chart Method. Wiley.
- [4] Klein, S.A., Beckman, W., 1979. A general design method for closed-loop solar energy systems. Solar Energy 22 (3), 269–282, Pergamon Press (Elsevier Science).
- [5] Gordon, J.M., Zarmi, Y., 1985. An analytic model for the long-term performance of solar thermal systems with well-mixed storage. Solar Energy 35 (1), 55–61, Pergamon Press (Elsevier Science).
- [6] Feuermann, D., Gordon, J.M., Zarmi, Y., 1984. A typical meteorological day (TMD) approach for predicting the long term performance of solar energy systems. Solar Energy 35, p.63-69. Pergamon Press.
- [7] Reddy, T.A., Gordon, J.M., DeSilva, I.P.D., 1987. MIRA: A one-repetitive day method for predicting the long term performance of solar energy systems. Solar Energy 39, p.123-133. Pergamon Journals.
- [8] ISO 9459-2: 1995. Solar heating -- Domestic water heating systems -- Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems.
- [9] Oliveira, A.C., 2007. A new look at the long-term performance of general solar thermal systems. Solar Energy 81, p.1361-1368. Elsevier Science.
- [10] Kalogirou, S.A., 2000. Performance of a solar water heater using artificial neural networks. World Renewable Energy Congress VI. Elsevier Science.